

文章编号:1000-582X(2010)02-0117-06

## 模糊域的图像边缘检测算法分析

李 刚<sup>1</sup>,朱久进<sup>2</sup>,王 越<sup>1</sup>,汪林林<sup>3</sup>

(1. 重庆理工大学 计算机学院,重庆 400050;2. 重庆大学 生物工程学院生物材料与仿生工程研究中心,重庆 400044;3. 重庆邮电大学 计算机学院,重庆 400065)

**摘 要:**提出一种基于模糊域的图像边缘检测算法,结合自适应模糊增强和多方向模糊形态学来检测模糊图像的边缘。自适应模糊增强采用滑动窗口对模糊图像进行分块增强,避免了全图单阈值增强引起的真实边缘损失,具有较强的适应图像区域变化的能力;多方向模糊形态学用多个不同方向的结构元素对增强图像进行运算,以提取具有方向性的真实边缘,并抑制无方向性的噪声。实验证明算法能够有效地检测出模糊图像边缘,抗噪能力强。

**关键词:**图像处理;边缘检测;模糊增强;模糊形态学

中图分类号:TP391.4

文献标志码:A

## Image edge detection algorithm in fuzzy domain

LI Gang<sup>1</sup>, ZHU Jiu-jin<sup>2</sup>, WANG Yue<sup>1</sup>, WANG Lin-lin<sup>3</sup>

(1. School of Computer, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, P. R. China; 2. Research Center of Bioinspired Materials Science and Engineering, College of Bioengineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. School of Computer, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China)

**Abstract:** An image edge detection algorithm in fuzzy domain is proposed, which combines adaptive fuzzy enhancement and multi-direction fuzzy morphology to detect the edges of fuzzy image. The adaptive fuzzy enhancement method enhances the fuzzy image within blocks with sliding windows to avoid losses of the real edges resulting from enhancing with single threshold for the whole image and lead strong adaptive ability to image region variance. The multi-direction fuzzy mathematical morphology operates on the enhanced fuzzy image with structure elements of multiple different directions to extract the real edges with directionality and restrain non directional noise. Experiments show the algorithm can detect fuzzy image edge effectively with strong antinoise ability.

**Key words:** image processing; edge detection; fuzzy enhancement; fuzzy mathematical morphology

传统的边缘检测方法多是依据边缘梯度来提取边缘信息,检测效果常常不理想,原因在于现实图像中通常包含大量的不完全或模糊的信息,特别是图像的边缘信息常由于各种因素被部分隐藏(不完全性)或歪曲(模糊性)<sup>[1-3]</sup>,这在遥感图像等复杂图像

中表现特别明显。由于人的视觉特性和图像信息本身的复杂性、相关性、不完整性和不精确性,以及建模困难等原因,使得将模糊理论应用于复杂图像的边缘检测不仅可行,而且十分有益,如由 Pal 提出的模糊增强算法<sup>[3-6]</sup>,能通过增大不同区域之间的对比

收稿日期:2009-10-10

基金项目:重庆市科技攻关项目(CSTC 2009AC2068);重庆市教育科技计划项目(KJ090617)

作者简介:李刚(1968-),男,重庆理工大学副教授,博士,主要从事图像处理方向研究,(Tel)13206181373;

(E-mail)thatsez@163.com。

使模糊边缘得以增强,但算法存在运算量大、适应性差等问题<sup>[7-11]</sup>。

另外,由于边缘和噪声都是高频信号,很难在噪声和边缘中作取舍,因此大多数边缘检测器对噪声都非常敏感。基于数学形态学的图像边缘检测方法,能在一定程度上较好地保持图像的细节特征、协调边缘检测精度与抗噪声性能的矛盾,与其他方法相比有其独特的优势,但通常结构元素都是固定、对称、单一的,使得算法的适应性和抗噪性仍然较差<sup>[12-13]</sup>。

基于模糊理论和模糊形态学,笔者提出了一种基于自适应模糊增强的多方向模糊形态学边缘检测算法。算法采用滑动窗口分块增强图像,每个分块子图的阈值由该子区域决定,避免了对全图用统一的单阈值增强所造成的真实边缘信息损失,使得图像增强具有较强的适应图像区域变化的能力;算法还在模糊域中用多方向结构元素对模糊增强后的图像进行模糊形态学运算以直接检测增强后的模糊图像边缘,不但能很好地检测具有方向性的真实边缘,还能有效抑制无方向性的噪声。

## 1 Pal 模糊增强边缘检测算法及其缺陷

按照模糊集的概念,一个大小为  $M \times N$  像素、 $L$  级灰度的图像

$$X = \bigcup_{m=1}^M \bigcup_{n=1}^N x_{mn}, \quad (1)$$

可以看作是一个模糊集,集内的每一个元素均具有相对于某个特定灰度级  $x_k$  (通常取  $x_k$  为最大灰度级  $L-1$ ) 的隶属度  $\mu_{mn}$ , 该模糊集称为图像的等效模糊集或图像的模糊特征平面,记为

$$U = \bigcup_{m=1}^M \bigcup_{n=1}^N \frac{\mu_{mn}}{x_{mn}}. \quad (2)$$

### 1.1 Pal 模糊增强边缘检测算法步骤

1) 利用隶属度函数  $G$  将式(1)所示形式的图像映射成式(2)所示形式的模糊隶属度矩阵。所采用的模糊映射  $G$  为

$$\mu_{mn} = G(x_{mn}) = (1 + \frac{L-1-x_{mn}}{F_d})^{-F_e}, \quad (3)$$

其中参数  $F_d, F_e$  与  $\mu_{mn}$  的形状有关,通常取  $F_e=2$ 。当  $x_{mn}=l_c$ , 且  $G(x_{mn})=G(l_c)=0.5$  时,称  $l_c$  为渡越点(即模糊性最大的点)。

2) 对模糊隶属度矩阵通过增强变换,增强边缘信息,削弱非边缘信息,获得增强后的模糊隶属度矩阵  $U'$ 。该增强变换为

$$\mu'_{mn} = T_r(\mu_{mn}) = T_1(T_{r-1}(G_{mn})), \quad (4)$$

$$T_1(\mu_{mn}) = \begin{cases} 2\mu_{mn}^2, & 0 < \mu_{mn} \leq 0.5; \\ 1 - 2(1 - \mu_{mn})^2, & 0.5 < \mu_{mn} \leq 1; \end{cases} \quad (5)$$

其中  $r$  为迭代次数,一般取  $r=2 \sim 3$ 。

3) 对  $U'$  进行模糊逆变换,得到增强图像  $X'$ 。模糊逆变换  $G^{-1}$  为式(3)所示模糊映射  $G$  的逆映射。

4) 提取增强图像  $X'$  的边缘。采用 Nakagowa 等人提出的“min”或“max”算子,获得图像的边缘矩阵为

$$\text{Edges} = [x''_{mn}]_{M \times N}, \quad (6)$$

$$x''_{mn} = |x'_{mn} - \min_Q \{x'_{mn}\}|, \quad m, n \in Q, \quad (7)$$

式中  $Q$  可取以点  $(m, n)$  为中心的  $3 \times 3$  大小的窗口。

### 1.2 Pal 模糊增强边缘检测算法的主要缺陷

1) 由式(3)得到的隶属度函数值最小值大于 0, 经增强变换后,将造成原图中相当多的低灰度值被硬性切割为 0, 这样将损失低灰度值边缘信息。

2) 算法没有充分利用图像已给出的统计信息,属于单阈值模糊增强,只能使处于阈值参数附近的那部分边缘得到增强,但同时却使远离阈值参数的其他边缘受到了抑制。

3) 算法中,变换  $G, T_r$  和  $G^{-1}$  均为非线性变换,包含了复杂的浮点运算,计算量大。而且经  $G$  和  $T_r$  变换后还要进行  $G$  的逆变换,这将使得  $G$  的形式对于增强结果的影响不大。

4) 模糊变换  $G$  中的参数  $F_d, F_e$  具有可调性,其选取很大程度决定了后续的图像处理结果,且与  $\mu_{mn}$  的形状有关,故存在一个参数寻优问题,然而目前还没有一个合理的指导原则来选取上述参数。

5) 算法没有抑制噪声的能力。当图像受到噪声干扰时,误检率高,效果不理想。

针对上述问题,提出基于模糊增强的多方向模糊形态学边缘检测算法,算法首先在模糊域内对图像进行自适应模糊增强,再在模糊域内对模糊增强后的图像用多方向模糊形态学算法检测边缘。

## 2 图像模糊化和自适应模糊增强

### 2.1 图像模糊化

为了保留更多的边缘信息,选择直线形隶属函数,将原始灰度图像映射到模糊集中得到模糊图像

$$\mu_{mn} = G(X_{mn}) = \frac{X_{mn} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (8)$$

其中  $\mu_{mn}$  为点  $(m, n)$  的隶属度;  $X_{mn}$  为像素点  $(m, n)$

的原灰度值;  $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$  分别为原始图像的灰度最小值和最大值。

### 2.2 自适应模糊增强

通常情况下,复杂图像中包含了多个目标和背景信息,并且很难区别开来。如图 1,在图像增强的时候,如果将图像 A 简单地区别成低灰度和高灰度两部分,会漏掉很多重要的边缘信息。为解决这个问题,可以采用滑动的小窗口 B 来处理,这是因为: 1)小窗口 B 只罩住了小部分区域和区域内的少量边缘,因此对图像的边缘细节变化更敏感;2)小窗口内增强时阈值的选取由该区域决定,阈值具有区域的自适应性,因此能增强各种灰度范围的边缘。

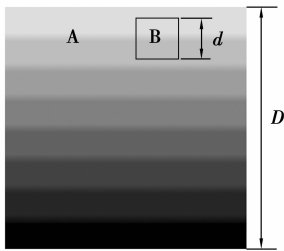


图 1 大小窗口对比

可见,对小窗口内的图像模糊增强后,各区域之间层次更分明,而且边缘两侧的灰度对比增强,其提取的边缘信息也就会更加精细。

自适应模糊增强算法的具体步骤为

1)选择恰当尺寸的滑动窗口。由于滑动窗口大小直接影响算法速度,窗口越大速度越慢,窗口越小速度越快,但是窗口太小又会使得模糊增强算法效果反而变差。根据多次实验,选择  $d \times d = 8 \times 8$ 。

2)计算滑动窗口内模糊增强的阈值  $T$ 。用平均灰度作为其窗口阈值,速度快,稳定性高,更适合于复杂图像

$$T = \left( \sum_{m=0}^{d-1} \sum_{n=0}^{d-1} \mu_{mn} \right) / N, \quad (9)$$

其中  $N$  为滑动窗口中的像素个数。

假设该窗口所覆盖区域内的隶属度范围为  $[\mu_{\min}, \mu_{\max}]$ ,则阈值  $T$  可将该窗口分割为前景和背景两部分,模糊增强能增大二者之间的差距。

3)隶属度区间的调整。将滑动窗口中的隶属度调整到区间  $[0, 1]$  中,并记为  $P_{mn}$

$$P_{mn} = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \frac{\mu_{mn} - T}{\mu_{\max} - T}, & \mu_{mn} \geq T; \\ 0.5 \frac{\mu_{mn} - \mu_{\min}}{T - \mu_{\min}}, & \mu_{mn} < T. \end{cases} \quad (10)$$

4)对滑动窗口中的图像进行模糊增强。利用常

用的模糊增强迭代公式将滑动窗口中的模糊图像  $P_{mn}$  增强为  $P_{mn}^T$

$$P_{mn}^T = \begin{cases} 2P_{mn}^2, & P_{mn} \leq 0.5; \\ 1 - 2(1 - P_{mn})^2, & P_{mn} > 0.5; \end{cases} \quad (11)$$

迭代次数一般为 2 次。

5)隶属度调整回原区间。利用式(10)的逆运算,将窗口内增强后的模糊图像调整回原模糊区间  $[\mu_{\min}, \mu_{\max}]$  中,获得模糊增强图像  $\mu'_{mn}$ 。

6)滑动窗口遍历整个图像,完成全图的模糊增强过程。滑动窗口一般有非重叠窗口、重叠窗口和半重叠窗口三种形式,其中非重叠窗口会产生虚假边缘,重叠窗口运算速度慢,半重叠窗口能获得效率和效果的较好折中,采用半重叠窗口。

上述模糊增强的过程将使图像中比较模糊的斜坡边缘增强为接近阶跃型的边缘,如图 2 所示。

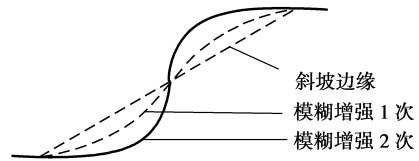


图 2 模糊增强

## 3 多方向模糊形态学边缘检测

常用的边缘检测算子是通过计算图像中局部区域内的差分来获得图像边缘,这类边缘检测算子对噪声比较敏感并且常常会在检测边缘的同时放大噪声。形态学边缘检测主要用形态学梯度算子来检测边缘,虽也对噪声比较敏感但不会加强或放大噪声,并且如果选择合理的形态学算子和多方向结构元素,可以得到对噪声不敏感甚至抑制较强噪声的效果。但在模糊域中的模糊图像在模糊增强以后,仍处于模糊域中,普通的形态学边缘检测算法并不适用,此时可考虑利用模糊形态学方法,在模糊域中直接检测图像边缘。

### 3.1 模糊形态学边缘检测

和数学形态学一样,模糊形态学也有膨胀和腐蚀两种基本算子,并且在模糊集下可以有多种定义形式,文献<sup>[14-15]</sup>中定义的模糊膨胀和模糊腐蚀分别为

$$\mu_{F \oplus B}(x) = \max_{y \in B} [\max[0, \mu_F(x - y) + \mu_B(y) - 1]], \quad (12)$$

$$\mu_{F \ominus B}(x) = \min_{y \in B} [\min[1, 1 + \mu_F(x + y) - \mu_B(y)]] \quad (13)$$

其中： $\mu_F$  为模糊图像； $\mu_B$  为模糊结构元素。

类似地可以定义模糊开、闭等形态学运算

$$\mu_{F \circ B} = (\mu_{F \oplus B}) \ominus B, \quad (14)$$

$$\mu_{F \bullet B} = (\mu_{F \ominus B}) \oplus B. \quad (15)$$

进而可定义多种模糊形态学梯度,如

$$g = \mu_{F \oplus B} - \mu_{F \ominus B}, \quad (16)$$

或

$$g = \mu_{F \oplus B} - \mu_F, \quad (17)$$

$$g = \mu_F - \mu_{F \ominus B}. \quad (18)$$

等作为图像的模糊形态学边缘。

如图 3 所示,左右两边分别从上往下看,依次为原始模糊斜坡边缘和模糊增强后的近似阶跃边缘,相应的模糊膨胀(图中点划线)与模糊腐蚀(图中虚线)结果,以及相应的模糊形态学梯度。由图可见,在没有经过模糊增强以前,所获得的模糊形态学梯度宽、幅度小,难以准确判断边缘点位置;经过模糊增强以后,获得的模糊形态学梯度窄、幅度大,更容易准确定位边缘点。

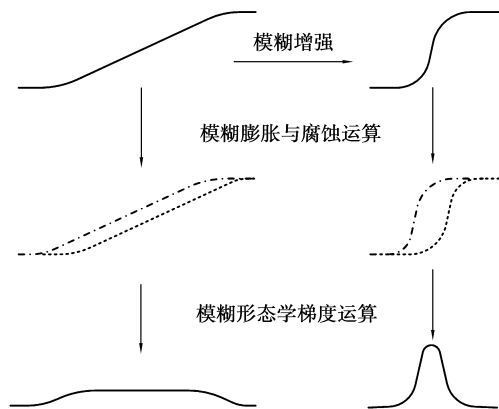


图 3 模糊增强前后的模糊形态学梯度

更为重要的是,由于模糊形态学边缘是在模糊域内通过模糊形态学梯度获得的,不必经过模糊逆变换过程,既减少了运算量,也避免了模糊逆变换所引起的图像信息损失,还具有通常的形态学梯度算法检测边缘的优点。

### 3.2 多方向模糊形态学边缘检测

基于梯度的边缘检测方法,本质上是检测信号的高频分量,但是信号的高频分量与信号的噪声很难分开,这就使得运用模糊增强技术过程中,在增强边缘的同时可能也增强了噪声。传统的采用单一结构元素的形态学边缘检测算法是对各个方向上的灰度变化同时进行探测,没有考虑图像边缘具有方向性而噪声无方向性这一特点,适应能力和抗噪能力均较差。

在形态学梯度运算中,具有特定方向的结构元素对其他方向的变化敏感,能够较好地检测出其他方向的边缘,并且能有效地排除那些无方向性的噪声。针对图像的真实边缘具有方向性而噪声具有多向一致性(即无方向性)的特点,如果采用多个不同方向的结构元素来探测图像在各个方向上的灰度变化,不但具有较强的抗噪能力,还具有很好的适应实际图像边缘方向性的能力。

多方向模糊形态学边缘检测算法采用多个不同方向的结构元素,如图 4 为 4 个方向的结构元素,也可以采用更多不同方向的结构元素<sup>[13,16,17]</sup>,结构元素大小可以是  $3 \times 3$ ,也可以为  $5 \times 5$  的。结构元素增多、增大,可以提高检测效果和抗噪能力,但运算时间也相应增加,采用图 4 所示的结构元素。

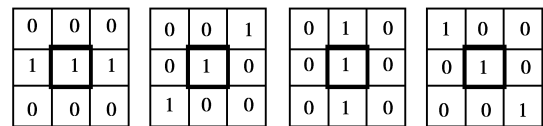


图 4 4 方向结构元素

多方向模糊形态学边缘检测算法的步骤为:

1) 用图 4 中的一个结构元素对模糊图像  $A$  进行模糊开运算得到模糊图像  $B_1$ ,对  $B_1$  进行模糊闭运算得到模糊图像  $C_1$ ,对  $C_1$  进行模糊膨胀得到模糊图像  $D_1$ ,计算  $E_1 = D_1 - C_1$ ;

2) 用图 4 中的其余结构元素重复上述步骤,依次得到其他方向的边缘  $E_2 \sim E_4$ ;

3) 对各边缘分量  $E_1 \sim E_4$  平均得到最终边缘  $E = (E_1 + E_2 + E_3 + E_4) / 4$ 。

## 4 实验结果及分析

以下分别对研究涉及的几种算法在 MATLAB 7.6 上进行了实验验证和分析,使用的图像是一幅由 NASA 提供的大小为  $480 \times 480$  像素的遥感图像。

图 5 为对原始图像的边缘检测结果,图中(a)~(f)依次为遥感图像原图、Pal 算法边缘、模糊形态学边缘、基于单阈值模糊增强的模糊形态学边缘、基于自适应模糊增强的模糊形态学边缘、基于自适应模糊增强的多方向模糊形态学边缘。由图可见,不管在图像的明亮还是灰暗部分,笔者提出的基于自适应模糊增强的多方向模糊形态学算法都能检测出更多边缘细节,获得的边缘也更为清晰、细致。

图 6 为对原始图像加入密度为 0.02 的椒盐噪声后的检测结果,图中(a)~(d)依次为 Pal 算法边

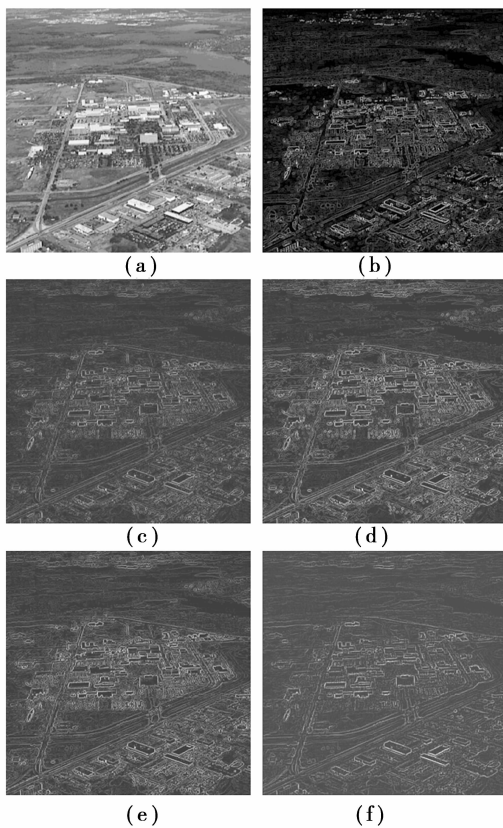


图5 原始图像边缘检测

缘、模糊形态学边缘、基于自适应模糊增强的模糊形态学边缘、基于自适应模糊增强的多方向模糊形态学边缘。提出的基于自适应模糊增强的多方向模糊形态学算法不但具有较强的抗噪能力,还能较好地检测出多数边缘细节。

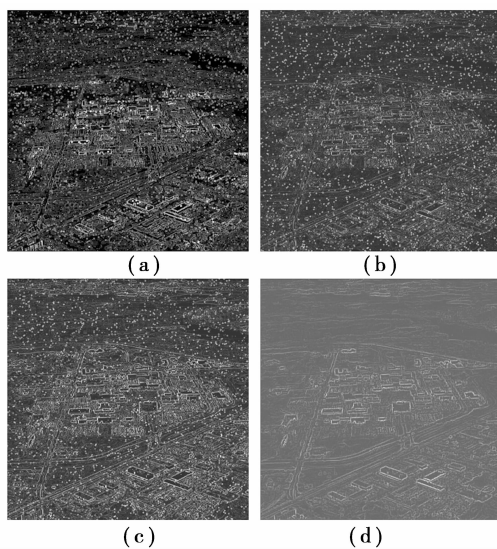


图6 噪声图像边缘检测

另外,图5中(b)~(f)的运行时间依次为:0.82、0.13、0.52、0.94、1.23 s。虽然算法所需时间

要多一些,但从算法的效果和抗噪能力方面来考虑,还是值得的。

## 5 结论

综上所述,由于每种单独的方法都有其天生的缺陷,自身很难克服,但如果将多种方法结合,就能使其发挥各自的优势,弥补各自的缺陷:

1)若图像边缘未被增强,单独采用形态学算子,则很难清晰地检测出图像中的模糊边缘;模糊增强后,边缘特征得到增强,模糊边缘变得明显,此时采用形态学算子检测边缘,边缘检测质量能得到提高;采用小窗口的自适应模糊增强能适应不同区域的阈值变化,避免了对全图用统一的单阈值增强所造成的真实边缘信息损失;模糊映射采用线性隶属度函数,算法相对简单。

2)模糊形态学方法在模糊域内检测图像边缘,避免了模糊逆变换运算;图像边缘具有方向性,多方向模糊形态学算子能较好地检测出具有方向性的边缘;噪声不具有方向性,多方向模糊形态学算子具有较强的抗噪能力,能大大削弱由于模糊增强引起的噪声增强。

因此,提出的基于自适应模糊增强的多方向模糊形态学边缘检测算法很好地利用了自适应模糊增强和多方向模糊形态学的优点,取得了边缘检测效果、抗噪性和运算速度的较好折中。

### 参考文献:

- [1] JACQUEY F, COMBY F, STRAUSS O. Fuzzy edge detection for omnidirectional images[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2008, 159(15): 1991-2010.
- [2] LIN Y, TIAN J, HE H G. Image segmentation via fuzzy object extraction and edge detection and its medical application[J]. *Journal of X-Ray Science & Technology*, 2002, 10(1/2): 95.
- [3] JUBAI A, JING B, YANG J. Combining fuzzy theory and a genetic algorithm for satellite image edge detection[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3013-3024.
- [4] PAL S K, GHOSH A. Image segmentation using fuzzy correlation[J]. *Information Sciences*, 1992, 62(3): 223-250.
- [5] PAL S K, KING R A. On edge detection of x-ray images using fuzzy set[J]. *IEEE Transactions on Pattern Anal Machine Intell*, 1983, 5(1): 69-77.
- [6] MITRA S, PAL S K. Fuzzy sets in pattern recognition and machine intelligence[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, 156(3): 381-386.

- [7] 张强劲, 杨丹, 张小洪, 等. 基于多尺度模糊逻辑的小波边缘检测方法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(10): 62-65.  
ZHANG QIANG-JIN, YANG DAN, ZHANG XIAO-HONG, et al. Wavelet edge detection method based-on multi-scale fuzzy logic [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(10): 62-65.
- [8] LI G, YANG F, WANG L L. An algorithm for remote sensing image edge detection based on fuzzy sets[C]. Proceedings of IITA08. Shanghai, China: [s. n.], 2008: 1087-1090.
- [9] CHACON M I, AGUILAR L D, DELGADO A S. Fuzzy modeling of image edge detection based on image complexity[J]. Nonlinear Studies, 2004, 11(1): 37-52.
- [10] BUSTINCE H, BARRENECHEA E, PAGOLA M, et al. Interval-valued fuzzy sets constructed from matrices: Application to edge detection. [J]. Fuzzy Sets & Systems, 2009, 160(13): 1819-1840.
- [11] CAO W, CHE R, YE D. An illumination-independent edge detection and fuzzy enhancement algorithm based on wavelet transform for non-uniform weak illumination images[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(3): 192-199.
- [12] 徐国保, 王骥, 赵桂艳, 等. 基于数学形态学的自适应边缘检测新算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(4): 997-999, 1002.  
XU GUO-BAO, WANG JI, ZHAO GUI-YAN, et al. Adaptive algorithm of edge detection based on mathematical morphology [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(4): 997-999, 1002.
- [13] 李刚. 基于模糊理论和模糊形态学的遥感图像边缘检测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [14] SINHA D, DOUGHERTY E R. Fuzzy mathematical morphology[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 1992, 3(3): 286-302.
- [15] SINHA D, SINHA P, DOUGHERTY E R, et al. Design and analysis of fuzzy morphology algorithms for image processing [J]. Fuzzy Systems, IEEE Transactions, 1997, 5(4): 570-584.
- [16] 杨帆, 汪林林, 王佐成. 一种新的多方向模糊形态学边缘检测算法[J]. 微计算机信息, 2009, 25(3): 299-301.  
YANG FAN, WANG LIN-LIN, WANG ZUO-CHENG. A new multi-directions algorithm for image edge detection based on fuzzy mathematical morphology [J]. Micro-computer Information, 2009, 25(3): 299-301.
- [17] 李刚, 张金荣, 朱雷, 等. 基于多方向模糊形态学的彩色遥感图像边缘检测算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(8): 104-107.  
LI GANG, ZHANG JIN-RONG, ZHU LEI, et al. Edge detection algorithm of color remote sensing image based on multi-direction fuzzy mathematical morphology [J]. Micro Electronics & Computer, 2009, 26(8): 104-107.

(编辑 侯 湘)